

AKÜ FEMÜBİD 19 (2019) 031205 (586-594)

AKU J. Sci. Eng. 19 (2019) 031205 (586-594)

DOI: 10.35414/ akufemubid.587112

Araştırma Makalesi / Research Article

# Süperkapasitör Uygulamaları için Nikel/Nikel Köpük Elektrodun İyonik Sıvı İçerisinden Elektrokimyasal Olarak Sentezi

Naime ÖZDEMİR<sup>1,\*</sup>, Perihan YILMAZ ERDOĞAN<sup>1</sup>, Hüseyin ZENGİN<sup>1</sup>, Abdulcabbar YAVUZ<sup>2</sup><sup>1</sup> Gaziantep Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Gaziantep, Türkiye<sup>2</sup> Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

Sorumlu yazar e-posta: [naimeozdemir027@gmail.com](mailto:naimeozdemir027@gmail.com) ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4744-1316>  
[yimazperihan8@gmail.com](mailto:yimazperihan8@gmail.com) ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1375-603X>  
[hzengin@gantep.edu.tr](mailto:hzengin@gantep.edu.tr) ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5540-725X>  
[ayavuz@gantep.edu.tr](mailto:ayavuz@gantep.edu.tr) ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7216-0586>

Geliş Tarihi: 04.07.2019;

Kabul Tarihi: 10.12.2019

## Öz

Nikel temelli elektrot, enerji depolama malzemeleri için kolin klorür ve üre bazlı iyonik sıvı içerisinden nikel köpük akım toplayıcı üzerine elektrokimyasal olarak depolandı. Kaplamaların KOH elektrolitinde nikel köpük üzerindeki elektrokimyasal davranışı, dönüşümlü voltametri tekniği ile incelendi. İyonik bir sıvıdan elektrodepolanan elektrotlar, pozitif potansiyelde (0 ile 0.6 V arasında) redoks reaksiyonuna sahip oldukları için katot elektrotu olarak kullanılabilir. SEM ile kaplanmamış ve kaplanmış nikel köpüğün yüzey morfolojisi incelendi. Nikel köpüğün kendisi 2B dökme nikelde daha büyük bir yüzey alanına sahiptir. Nikelin iyonik sıvıdan elektrodepolanmasında yüksek yüzey alanına sahip mikropartiküller elde edilmiştir. Bu yüzden nikel kaplı nikel köpük elektrot ile bazik elektrolit arasındaki iyon ve elektron transfer hızı artırıldı. Nikel temelli nikel köpük elektrotunun KOH elektroliti içerisindeki reaksiyon mekanizması, difüzyon kontrollü olarak gerçekleşti. Bağlayıcı içermeyen nikel köpük üzerindeki nikel bazlı elektrot, 5 mV s<sup>-1</sup> tarama hızında 1055 F g<sup>-1</sup>lik spesifik kapasitansa sahiptir. İyonik sıvı içerisinden nikel köpük yüzey üzerine elde edilen nikel temelli kaplamalar, enerji depolama cihazlarında katot elektrot olarak kullanılabilir.

### Anahtar kelimeler

Elektrodepolama;  
Dönüşümlü voltametri;  
İyonik sıvı; Nikel köpük;  
Enerji depolama

## Electrochemical Synthesis of Nickel/Nickel Foam Electrode From Ionic Liquid for Supercapacitor Applications

### Abstract

Nickel based electrode was deposited electrochemically on a nickel foam current collector from choline chloride and urea based ionic liquid for energy storage materials. Electrochemical behaviour of the coatings on the nickel foam in KOH electrolyte was characterised by means of cyclic voltammetry. The electrodes electrodeposited from an ionic liquid could be used as a cathode electrode as they have redox reaction at positive potential (between 0 and 0.6 V). SEM provides the surface morphology of uncoated and coated nickel foam. Nickel foam itself has a greater surface area than a 2D bulk nickel. Nickel microparticles with high surface area on a foam were obtained by electrodeposition of nickel from ionic liquid. The rate of ion and electron transfer between nickel coated nickel foam electrode and alkaline electrolyte has been increased. The reaction mechanism of nickel coated foam electrode was controlled by diffusion step in KOH. Nickel-based electrode on nickel foam which did not require a binder had a specific capacitance of 1055 F g<sup>-1</sup> at a scan rate of 5 mV s<sup>-1</sup>. Electrodeposited nickel based coatings on nickel foam from an ionic liquid can be used as a potential cathode electrode in energy storage devices.

### Keywords

Electrodeposition;  
Cycling voltammetry;  
Ionic liquid; Nickel  
foam; Energy storage

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Elektrokimyasal kapasitörler veya ultrakapasitörler olarak da bilinen süperkapasitörler, yüksek güç

kapasitesine, uzun çevrim ömrüne, düşük bakım giderlerine ve hızlı şarj-deşarj yapısına sahip olması sebebiyle önemli bir enerji depolama sistemi olarak

ilgi görmektedir (Ribeiro *et al.* 2001). Süperkapasitörler genellikle elektrot malzemeleri, elektrolitler, ayırıcılar ve akım toplayıcılardan oluşur (Winter and Brodd 2004). Elektrot malzemesi, süperkapasitörlerin genel elektrokimyasal performansını düzenleyen en önemli bileşenlerden biridir (Wang *et al.* 2012). Öte yandan, ideal bir süperkapasitör elektrot malzemesi genellikle yüksek spesifik yüzey alanı, kontrollü gözeneklilik, yüksek elektronik iletkenlik, istenen elektroaktif bölgeler, yüksek termal stabilite, kimyasal stabilite, düşük hammadde ve üretim maliyeti gibi birçok özellik gerektirir (Wang *et al.* 2009). Şimdiye kadar, süperkapasitörler için çeşitli aktif elektrot malzemeleri geliştirmek için önemli çabalar sarf edilmiştir. Bunlar arasında, geçiş metal oksitler yüksek kapasitansları ve yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Yu *et al.* 2015). Öte yandan, yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olan bazı metal oksitler (rutenyum oksitleri) yüksek maliyetliken, bazı ekonomik metal oksitler/hidroksitler (bakır oksitleri, kobalt oksitleri gibi) düşük şarj kapasitesine ve düşük kararlılığa sahip olabilmektedirler. Yüksek şarj-deşarj kararlılığına sahip, ekonomik metal oksitlerin hızlı iyon ve elektron taşınması amaçlanmaktadır (Wang *et al.* 2011).

Yüksek performanslı enerji depolama cihazları, hızla artan küresel enerji tüketiminden dolayı modern toplumda acil talep görmektedir (Chu and Majumdar 2012). Enerji depolama cihazları arasında, süperkapasitörler son zamanlarda geleneksel kapasitörlere göre daha yüksek bir enerji yoğunluğuna ve diğer güç cihazlarına göre daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahip oldukları için çalışılmaktadırlar (Arico *et al.* 2011). Süperkapasitörlerde elektrot malzemesi olarak metal oksitler/hidroksitler, iletken polimerler ve karbon temelli malzemeler kullanılmaktadırlar. Faradaik reaksiyonlara sahip metal oksit/hidroksit esaslı malzemeler ve iletken polimer elektrotlara psödokapasitörler denir. Metal oksit psödokapasitörleri, yalnızca kullanışlı mekanik, elektronik veya yapısal özelliklere sahip değildir, aynı zamanda, genel olarak, çoklu yükseltgenme

basamakları nedeniyle yüksek kapasitans ve güç yoğunluklarına sahiptir (Zhi *et al.* 2013). Karbon temelli malzemelerden oluşan süperkapasitör elektrodlarına elektrokimyasal çift-katmanlı kapasitörler denilmektedirler. Elektrotların elektrik iletkenliğini ve yüzey alanını artırmak için hibrit-nanokompozitler geliştirilmektedir. Bunlar için nanoparçacıklardan, karbon nanotüplerden, yüksek iletkenliğe sahip olan grafenden oluşan katkı malzemeli kompozitler yüksek iletkenlik, elektrokimyasal kararlılık, yüksek yüzey alanı, yüksek mekanik özellikler nedeniyle ilgi çekmektedir (Greiner *et al.* 2012).

Metal oksit psödokapasitörler, süperkapasitör uygulamaları için elektrot olarak kullanabilirler bunlardan bazıları: CuO (Dubal *et al.* 2013), VO<sub>2</sub> (Boukhalfa *et al.* 2012), IrO<sub>2</sub> (Hu *et al.* 2002), FeO (Çınar Demir 2018), CoO (Kandalkar *et al.* 2008), SnO<sub>2</sub> (Pusawale *et al.* 2011), MoO<sub>2</sub> (Mendoza-Sánchez *et al.* 2013), RuO<sub>2</sub> (Algharaibeh *et al.* 2009), MnO<sub>2</sub> (Sharma *et al.* 2008), NiO (Lu *et al.* 2011) ve bunların hidroksit formlarıdır. Bu metal oksitler arasında nikel temelli elektrotlar, kullanım kolaylığı, yüksek teorik kapasitansı, düşük maliyeti ve yüksek termal ve kimyasal kararlılığı nedeniyle, psödokapasitörlerde önemli ve yaygın olarak kullanılan metal oksitlerden biridir (Zhang *et al.* 2009). NiO, Ni(OH)<sub>2</sub>, Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve NiOOH gibi nikel oksitlerin farklı kristal fazları enerji depolama malzemeleri olarak araştırılmıştır (Aghazadeh *et al.* 2016, Yadav and Chavan 2018).

Elektrolitler, elektrokimyasal uygulamalarda elektrotlarla birlikte önemli bir bileşendir. Geleneksel çözeltiler çözücü moleküllerden ve çözünen iyonlardan oluşur. Termal olarak eritilmiş tuzlara iyonik sıvılar veya erimiş tuzlar denir. İyonik sıvılar sadece iyonlara sahiptir ve su ya da alkol gibi çözücülerden oluşmazlar (Wu *et al.* 2019). Oda sıcaklığı iyonik sıvıları polimerlerin veya metallerin/alaşımının elektrokimyasal sentezi için kullanılmaktadır. Oda sıcaklığı iyonik sıvılar iletkenlikleri ve geleneksel sulu/organik çözücülere kıyasla büyük potansiyel pencereleri nedeniyle elektrokimyasal uygulamalarda kullanılan alternatif çözücülerdir (Kar *et al.* 2019). Derin ötektik

çözücülerin fiziksel özellikleri iyonik sıvılara benzerdir. Ayrıca derin ötektik çözücüler ucuz olmaları, hazırlanmaları kolay olmaları ve genellikle toksik olmamaları gibi bazı avantajları vardır. Bu nedenle, derin ötektik çözücüler metallerin elektrokimyasal olarak elde edilmesi için kullanılabilir (Smith *et al.* 2014).

Bu çalışmanın amacı, 0,2 M NiCl<sub>2</sub> içeren iyonik sıvı içerisinde nikel köpük yüzeyi üzerine nikelin elektrokimyasal olarak kaplanıp kaplanmadığını belirlemektir. Elde edilen nikel bazlı elektrodun elektrokimyasal performansının belirlenmesi için 1 M KOH elektrolitindeki elektrokimyasal davranışı incelenmiştir. Elde edilen elektrotların kapasitans özellikleri incelenerek, süperkapasitörlerdeki uygulanabilirliği irdelenmiştir.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1. Materyaller**

Üre (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>, Merck, %99), nikel (II) klorür heksahidrat (NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, Merck, %98), kolin klorür (HOC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>N(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>Cl, Merck, %98), potasyum hidroksit (KOH, Merck, %90) kullanıldı. Bu malzemeler saflaştırılmadan direkt olarak kullanılmıştır.

### **2.2. Nikelin elektrokimyasal depolanması**

Bu çalışmada kullanılan iyonik sıvı, homojen ve şeffaf bir çözelti ortaya çıkana kadar 1:2 mol oranında kolin klorür ve üre 50 °C'de karıştırılarak hazırlandı. İyonik sıvı elektroliti içinde 0,2 M NiCl<sub>2</sub> çözülerek elektrokimyasal depolanma çözeltisi hazırlandı. Isıtmayla birlikte, çözelti içerisinde az miktarda bulunan su moleküllerinin çözelti içinde tamamen buharlaşması sağlandı. Nikel temelli elektrotlar, hazırlanan iyonik sıvı çözeltiden nikel köpük yüzey üzerine elde edildi. Nikel temelli elektrotlar, 100 saniye boyunca -1 V sabit potansiyel uygulanarak 65 °C'de kronoamperometrik yöntemle elektrokimyasal olarak elde edildi.

Nikel temelli elektrotların elektrokimyasal olarak depolanmasında, klasik üç elektrotlu elektrokimyasal hücre sistemi kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak nikel köpük, referans elektrot

olarak bir platin tel ve karşıt elektrot olarak titanyum kaplı platin levha kullanıldı. İyonik sıvılar içerisinde kullanılacak referans elektrotunda su olmaması gereklidir, bu yüzden susuz çözeltilerde (elektrodepolamada) referans elektrodu olarak platin tel kullanılmıştır. Elektrokimyasal depolama işleminden önce, nikel köpük yüzeyi damıtılmış suyla yıkandı ve sıcak hava ile kurutuldu. Elektrokimyasal depolama çözeltisine üç elektrot sistemi yerleştirildi; çalışma elektrodu ve karşıt elektrot birbirine paralel yerleştirildi. Nikel temelli elektrotlar, elektrokimyasal biriktirme işleminden sonra suyla yıkandı ve sıcak hava ile kurutuldu. Yıkamanın amacı, çözelti ortamından yabancı maddeleri uzaklaştırmaktır.

### **2.3. Elektrodun Karakterizasyonu**

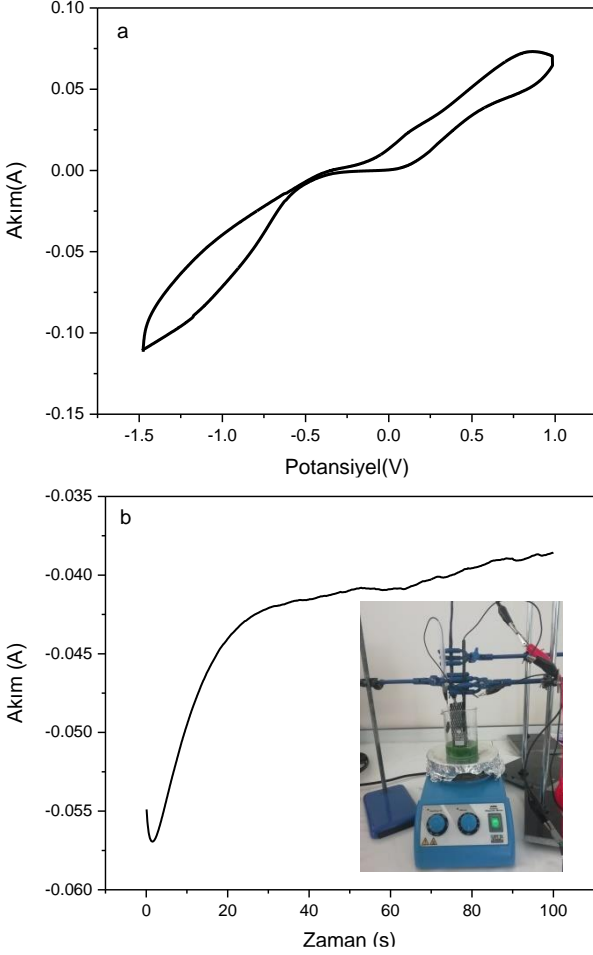
Nikel köpük yüzey üzerindeki nikel temelli filmlerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (Zeiss Gemini 300 FEGSEM, Carl Zeiss, Oberkochen, Almanya) ile incelenmiştir. İyonik sıvı çözeltiden elektrokimyasal olarak biriktirilmiş nikel temelli elektrot, elektrokimyasal karakterizasyon için 1 M KOH elektroliti içine yerleştirildi. Elektrotların elektrokimyasal analizi, üç elektrotlu potentiostat (AMETEK VersaSTAT3, Princeton Applied Research, OakRidge, TN, ABD) kullanılarak yapıldı. Tüm elektrokimyasal çalışmalar için nikel temelli elektrotlar ve titanyum kaplı platin levha karşıt elektrot olarak kullanılmıştır. Referans elektrot olarak Ag/AgCl (doymuş KCl) sulu KOH elektrolitinde kullanıldı. Döngüsel voltamogramlar, 0 V ile +0,6 V potansiyel aralığında, 5 mV s<sup>-1</sup> ile 100 mV s<sup>-1</sup> arasında değişen çeşitli tarama hızlarında elde edildi.

## **3. Bulgular ve Tartışma**

### **3.1. İyonik sıvı içerisinde elektrot sentezi**

Nikel temelli elektrot, 0,2 M NiCl<sub>2</sub> içeren kolin klorür ve üreden oluşan elektrolit içerisinde 100 saniye boyunca -1 V uygulanarak nikel köpük yüzey üzerine kronoamperometrik yöntem ile elde edildi. Şekil 1a'nın gösterdiği gibi nikel köpük elektrodu, iyonik sıvı elektroliti içerisinde etkin olduğu voltajı belirlemek için döngüsel voltametri tekniği ile -1.5

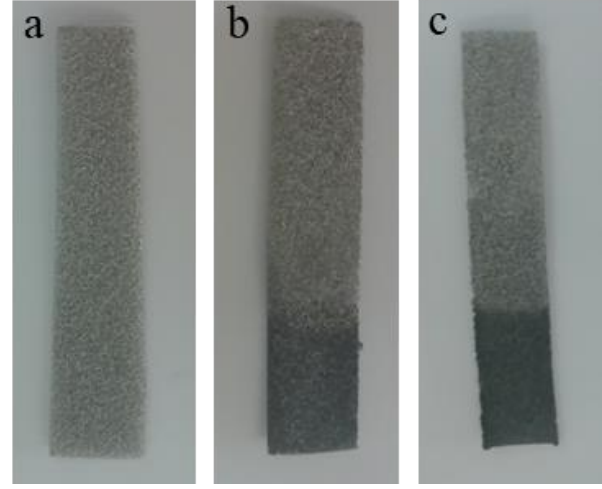
V ile 1 V arasında taranmıştır. Nikel köpük elektrolitin iyonik sıvı içerisinde -0,6 V'dan daha düşük voltajlarda çalışılabileceği belirlendi. Bu yüzden bu çalışmada, uygulanan potansiyel olarak -1 V'da kaplama yapıldı. Şekil 1b, nikel köpük elektroduna  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvıda 100 saniye boyunca -1 V uygulanarak elde edilen kronoamperometrik verileri göstermektedir.



**Şekil 1.** a) 0,2 M  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı elektroliti içerisinde kaplama yapılamamış nikel köpük çalışma elektronunun dönüşümlü voltamogram tarama eğrisi b)  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı elektrolitine -1 V potansiyel uygulayarak nikel köpük yüzey üzerine elde edilen nikel filmin kronoamperometrik verileri.

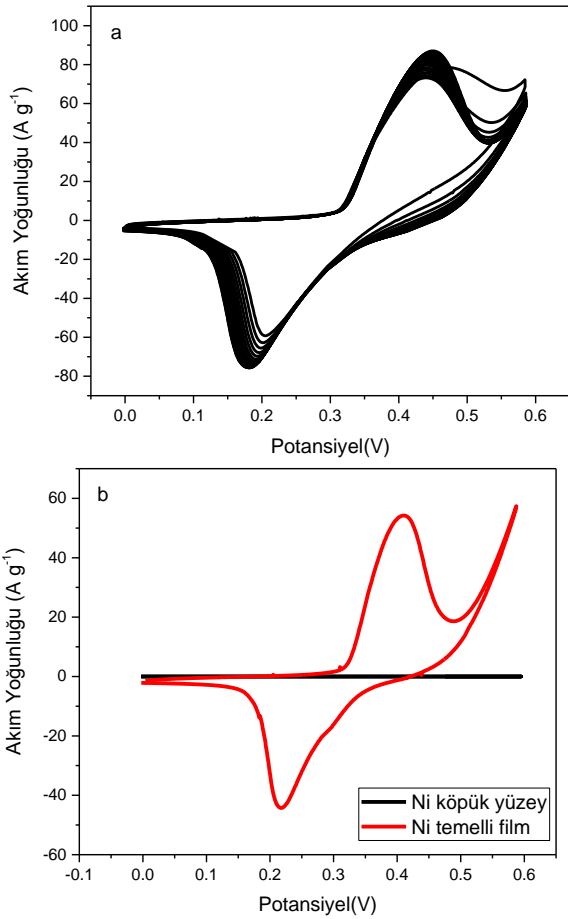
Nikel köpük çalışma elektrodunun elektrokimyasal olarak depolamadan önceki görüntüsü Şekil 2a'da verilmiştir. Şekil 2b, 0,2 M  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı içerisinde 100 saniye boyunca -1 V'luk potansiyel uygulanarak elektrokimyasal olarak sentezlenen Nikel/Nikel köpük elektroduna ait görüntüdür. Şekil

2c'de ise elektrokimyasal olarak sentezlenen nikel temelli elektrodun 1 M KOH elektroliti içerisinde polarizasyon sonrasındaki hali görülmektedir.



**Şekil 2.** (a) nikel köpük yüzeyine; (b)  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı içerisinde nikel köpük üzerine elde edilen nikel filme ve (c) KOH elektroliti içerisinde taranan nikel temelli elektroda ait fotoğraflar.

Nikel kaplaması  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı elektroliti içerisinde elde edildi ve sonra elektrokimyasal performansı için KOH elektrolitine aktarıldı. Şekil 3a, 1 M KOH elektrolitinde 0 V ile +0,6 V potansiyel aralığında nikel temelli elektrodun dönüşümlü voltammetrik eğrilerini göstermektedir (Xiong *et al.* 2015). Şekil 3a, 1 M KOH elektrolitinde elektrodun ilk 10 taramadan sonraki eğrilerini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, bu eğriler film kararlı hale geldikten sonraki çevrimlerdir. Şekil 3, kaplama yapılmamış nikel köpüğün (Şekil 3b'de siyah çizgi) ve nikel köpüğü üzerine iyonik sıvı içerisinde elde edilen nikel bazlı elektrodun KOH elektrolitinde (Şekil 3b'de kırmızı çizgi)  $20 \text{ mV s}^{-1}$  tarama hızındaki voltammetrik eğrilerini göstermektedir. Nikel köpük yüzeyi KOH elektrolitinde elektroaktiftir. Köpük yüzey üzerine nikel film kaplandığında elektrodun elektroaktifliği artmıştır. Bu iki voltamogram eğrileri karşılaştırıldığında kaplama yapılmamış nikel köpük yüzey, film kaplanmış elektroda göre düşük elektrokimyasal aktiflik göstermektedir.



**Şekil 3.** a) iyonik sıvıda elde edilen nikel temelli modifiye elektrodun 1 M KOH elektrolitinde ilk 10 dönüşümlü voltametrik eğrileri ( $50 \text{ mV s}^{-1}$  tarama hızında); b) iyonik sıvıdan elde edilen nikel temelli filmin ve kaplama yapılmamış nikel köpük yüzeyin KOH elektrolitinde  $20 \text{ mV s}^{-1}$  tarama hızında dönüşümlü voltamogram eğrileri.

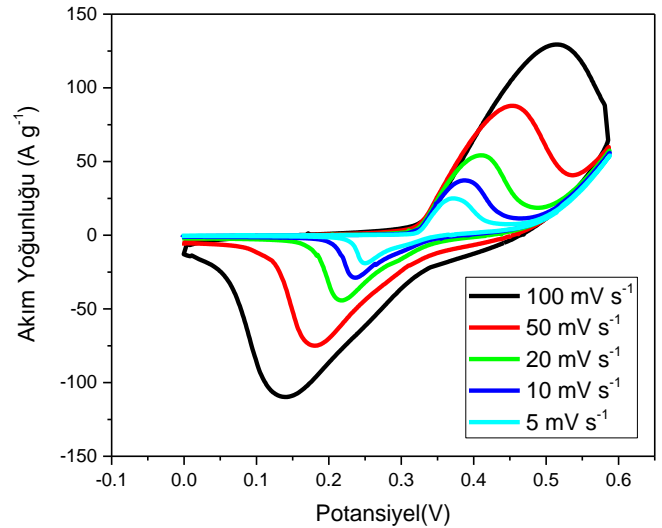
### 3.2. Nikel/Nikel köpük elektrodun karakterizasyonu

Nikel temelli filmin elektrokimyasal karakterizasyonu, 1 M KOH elektrolitinde (Şekil 4) gerçekleştirilmeden önce bu kısımda kaplanmamış (Şekil 5a ve Şekil 5b) ve kaplanmış elektrotların morfolojileri verilmiştir. Elektrotların iki farklı çözünürlükteki SEM görüntüleri burada sunulmaktadır. Nikel köpük yüzeyi gözenekli bir yapıya sahiptir. Nikel köpük yüzey üzerine elektrokimyasal olarak film kaplandığında

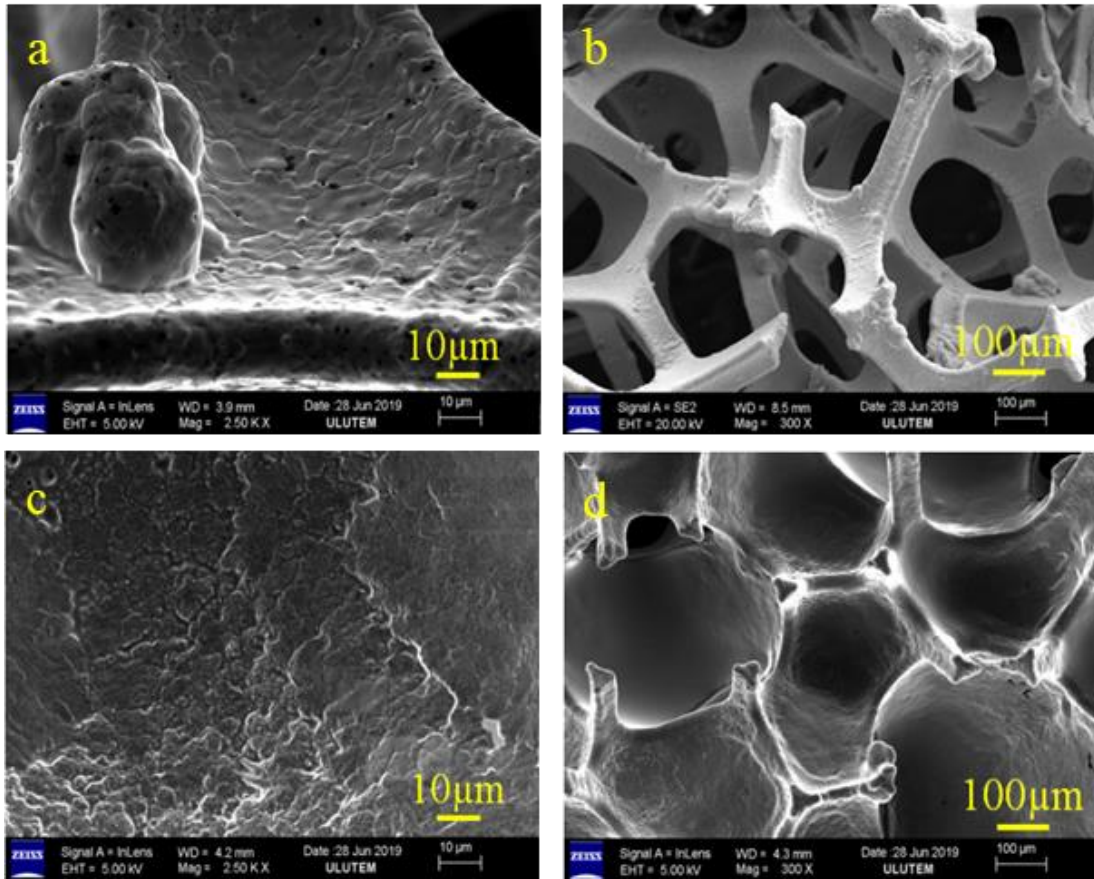
elektronlar ve iyonlar daha yüksek yüzey alanında etkin olacağından yüksek elektrokimyasal performansa sahip olacaktır. Nikel temelli film,  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı elektrolitinde nikel köpük yüzey üzerine  $-1 \text{ V}$ 'luk bir potansiyel uygulanarak elde edildi ve elde edilen kaplamaların yüzey görüntüleri Şekil 5c ve Şekil 5d'de verilmiştir. Şekil 5d'de gözlenen toplanmış mikroparçacıklara sahip olan nikel filmi, Şekil 5c'de gösterildiği gibi homojen ve çatlaksız olmuştur.

### 3.3. Elektrokimyasal ölçümler

Nikel temelli filmin elektrokimyasal karakterizasyonu, 1 M KOH elektrolitinde gerçekleştirildi. Şekil 4, nikel köpük üzerine elde edilen kaplamaların 1 M KOH elektrolitinde 5, 10, 20, 50 ve  $100 \text{ mV s}^{-1}$  tarama hızlarında 0 V ila 0,6 V tarama aralığında dönüşümlü voltamogram eğrilerini gösterir. Tarama hızı arttıkça, akım yoğunluğu artmaktadır. Şekil 4 incelendiğinde yükseltgenme ve indirgenme basamaklarının meydana geldiği voltajın, tarama hızı değişmiş olsa bile, önemli ölçüde değişmediği görülmektedir.

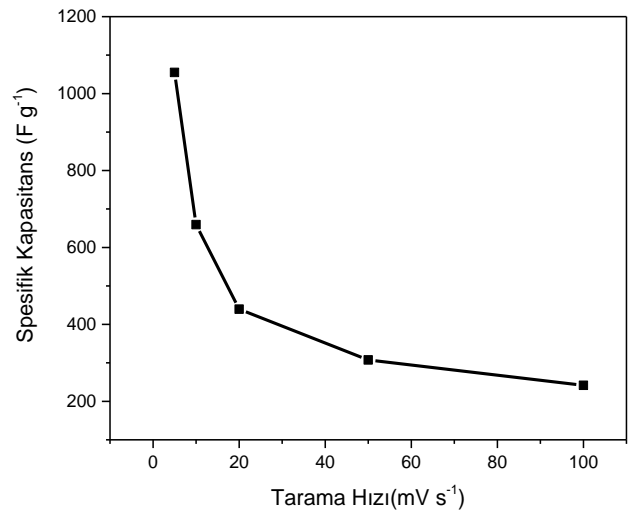


**Şekil 4.** 0,2 M  $\text{NiCl}_2$  çözeltisinde  $-1 \text{ V}$  uygulanarak elde edilen elektrodun 1 M KOH elektroliti içinde 5, 10, 20, 50 ve  $100 \text{ mV s}^{-1}$  tarama hızlarında oluşan dönüşümlü voltamogram eğrileri.



Şekil 5. Taramalı elektron mikrografları (SEM) (a,b) kaplama yapılmamış nikel köpük yüzeyi (c,d) Nikel köpük çalışma elektroduna  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı elektrolitinde 100 saniye elektrokimyasal depolama süresinde -1 V uygulanarak elde edilen elektroda ait görüntülerdir.

Elektrokimyasal olarak elde edilen elektrodun 1 M KOH elektrolitinde tarama hızının artması, spesifik kapasitans özelliklerine etkilemektedir (Lu *et al.* 2009). Şekil 6, nikel temelli elektrodun spesifik kapasitansının ( $C_s$ ) tarama hızına bağlı eğrisini göstermektedir. Spesifik kapasitans değerinin artan tarama hızı ile azaldığı görülmektedir. Spesifik kapasitans değeri çeşitli tarama hızlarında  $5 \text{ mV s}^{-1}$  ile  $100 \text{ mV s}^{-1}$ 'de elde edilen Şekil 4'deki dönüşümlü voltamogram eğrilerine dayanarak hesaplanmıştır. Yüksek tarama hızında düşük kapasitansın sebebi sınırlı zaman aralığından dolayı elektrodun tüm aktif bölgelerinin kullanılmamasından kaynaklanır (Simon and Gogotsi 2010). Zamana (hızlı taramaya) bağlı olarak kapasitansın değişmesi, süperkapasitör uygulamaları için önemli bir faktördür. Nikel köpük yüzey üzerine elde edilen nikel temelli elektrot maksimum spesifik kapasitansı  $5 \text{ mV s}^{-1}$  tarama hızında  $1055 \text{ F g}^{-1}$ 'dir.

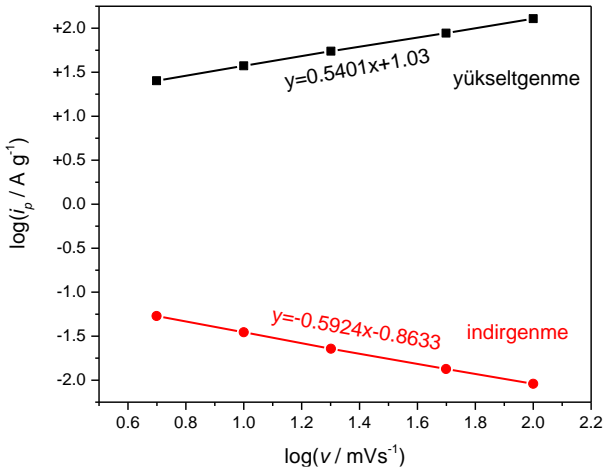


Şekil 6. 0,2 M  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı elektroliti içerisinde -1 V uygulanarak elde edilen filmin çeşitli tarama hızlarına ait KOH içerisindeki spesifik kapasitans eğrisi.

Cottrell denklemi kullanılarak elektron transferi ve iyon taşıma mekanizmaları açıklanabilir (Plieth 2008).  $\log(v)$  ve  $\log(i_p)$  grafiği (Şekil 7) 1 M KOH



elektroliti içindeki nikel temelli elektrodun sınırlayıcı reaksiyonunu anlamak için çizilmiştir. Anodik ve katodik eğrilerin zirveleri olan  $i_p$  ve tarama hızı Şekil 4'ten alınmıştır.  $\log(i_p) - \log(v)$  eğimi 0,5 olduğunda, elektrot ile elektrolit arasındaki reaksiyon mekanizması difüzyon kontrollüdür. Eğim 1 olduğunda ise yüzey kontrollü bir mekanizmaya sahip olduğu kabul edilir. Eğim 0,5'ten küçük olduğunda, reaksiyon mekanizması kinetik olarak kontrol edilir ve bu durum enerji depolama aygıtları için uygun değildir. Reaksiyon, 0,5 ile 1 arasında bir eğime sahip ise hem yüzey hem de difüzyon kontrollü mekanizmaların birleşimine sahiptir. KOH elektrolitinde nikel temelli filmin tarama hızının logaritmasına ( $\log v$ ) karşılık gelen akım pik değerlerinin logaritması ( $\log i_p$ ) Şekil 7'de gösterilmektedir. Eğim, sırasıyla yükseltgenme ve indirgeme aşamaları için 0.54 ve 0.59 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler 0,5 ila 1 arasında olduğundan, sınırlayıcı reaksiyon mekanizmasının difüzyon ve yüzey kontrollü mekanizmalar arasında gerçekleştiği ve genel olarak difüzyon kontrollü olduğu söylenebilir.



**Şekil 7.** Nikel köpük üzerindeki nikel temelli filmin yükseltgenmesi ve indirgenmesi için  $\log(i_p)$  ve  $\log(v)$  grafikleri; veriler Şekil 4'ten alınmıştır.

#### 4. Sonuç

Özetle, nikel köpük yüzey üzerine  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvıda elde edilen nikel temelli elektrot, bağlayıcı içermeyen bir süperkapasitör elektrodu olarak kolay ve uygun maliyetli bir işlemlerle sentezlendi.  $\text{NiCl}_2$  içeren iyonik sıvı elektroliti içerisinde 100 saniye boyunca -1 V'luk potansiyel uygulanarak

kronoamperometrik olarak elde edilmiştir. Sentezlenen elektrodun elektrokimyasal performansı 1 M KOH elektroliti içerisinde incelenmiştir. Elde edilen nikel temelli elektrodun çalışma elektrodu olarak kullanılan nikel köpükten KOH elektroliti içerisinde daha yüksek elektroaktiflik gösterdiği belirlendi.

Elektrokimyasal olarak elde edilen elektrotta bulunan nikel köpük yüzeyindeki nikel bazlı kaplama yüksek yüzey alanına sahiptir ve bu yüksek yüzey alanı süperkapasitörlerin yüksek iyon transferleri için istenen bir durumdur. Bunun sonucunda daha kararlı ve yüksek kapasitansa sahip elektrotlar elde edilmiştir. Elde edilen nikel/nikel köpük elektrotlar,  $5 \text{ mV s}^{-1}$  tarama hızında  $1055 \text{ F g}^{-1}$  spesifik kapasitansa sahiptir. Elde edilen elektrotlar süperkapasitör uygulamaları için yüksek performans, yüksek tarama kararlılığı ve yüksek elektrokimyasal performans sergiler. Elde edilen nikel/nikel köpük elektrodun sınırlayıcı reaksiyon mekanizması genel olarak difüzyon kontrollü mekanizma tarafından kontrol edilir.

#### Teşekkür

NO ve PYE Yükseköğretim Kuruluna, YÖK 100/2000 Doktora Burs Programı için teşekkür ederler.

#### 5. Kaynaklar

- Aghazadeh, M., Amir R., Mohammad Reza G., and Mohammad G.M., 2016. Nickel Oxide Nano-Rods/Plates as a High Performance Electrode Materials for Supercapacitors; Electrolysis and Evolution of Charge Storage Ability. *Int. J. Electrochem. Sci* **11**, 11002–15.
- Algharaibeh, Z, Xiaorong L, and Peter G.P, 2009. An Asymmetric Anthraquinone-Modified Carbon/Ruthenium Oxide Supercapacitor. *Journal of Power Sources* **187(2)**, 640–43.
- Arico, A. S., Bruce, P., Scrosati, B., Tarascon, J. M., Van Schalkwijk, W., 2011. Nanostructured Materials for Advanced Energy Conversion and Storage Devices. In *Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group*, World Scientific, 148–59.
- Boukhalfa, S., Evanoff, K., Yushin, G., 2012. Atomic Layer Deposition of Vanadium Oxide on Carbon Nanotubes for High-Power Supercapacitor Electrodes. *Energy & Environmental Science* **5(5)**,

6872–79.

- Chu, S., Majumdar, A., 2012. Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future. *nature* **488**(7411), 294.
- Çınar Demir, K., 2018. Elektrokimyasal Büyütme Tekniğiyle Büyütülen Geçirgen NiO İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* **24**(7), 1315–1324.
- Dubal, D. P., Gund, G. S., Lokhande, C. D., Holze, R., Chandrakant D. L., and Rudolf Holze, 2013. CuO Cauliflowers for Supercapacitor Application: Novel Potentiodynamic Deposition. *Materials Research Bulletin* **48**(2), 923–28.
- Greiner, M. T., Chai, L., Helander, M. G., Tang, W. M., Lu, Z. H., 2012. Transition Metal Oxide Work Functions: The Influence of Cation Oxidation State and Oxygen Vacancies. *Advanced Functional Materials* **22**(21), 4557–68.
- Hu, C. C., Huang, Y. H., Chang, K. H., 2002. Annealing Effects on the Physicochemical Characteristics of Hydrous Ruthenium and Ruthenium–Iridium Oxides for Electrochemical Supercapacitors. *Journal of Power Sources* **108**(1–2), 117–27.
- Kandalkar, S. G., Gunjekar, J. L., Lokhande, C. D., 2008. Preparation of Cobalt Oxide Thin Films and Its Use in Supercapacitor Application. *Applied Surface Science* **254**(17), 5540–44.
- Kar, M., Tutusaus, O., MacFarlane, D. R., Mohtadi, R., 2019. Novel and Versatile Room Temperature Ionic Liquids for Energy Storage. *Energy & Environmental Science*.
- Lu, Q., Lattanzi, M. W., Chen, Y., Kou, X., Li, W., Fan, X., Xiao, J. Q., 2011. Supercapacitor Electrodes with High-energy and Power Densities Prepared from Monolithic NiO/Ni Nanocomposites. *Angewandte Chemie International Edition* **50**(30), 6847–50.
- Lu, W., Qu, L., Henry, K., Dai, L., 2009. High Performance Electrochemical Capacitors from Aligned Carbon Nanotube Electrodes and Ionic Liquid Electrolytes. *Journal of Power Sources* **189**(2), 1270–77.
- Mendoza-Sánchez, B., Brousse, T., Ramirez-Castro, C., Nicolosi, V., Grant, P. S., 2013. An Investigation of Nanostructured Thin Film  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> Based Supercapacitor Electrodes in an Aqueous Electrolyte. *Electrochimica Acta* **91**, 253–60.
- Plieth, W. 2008, *Electrochemistry for Materials Science*. Elsevier, 190-192.
- Pusawale, S. N., Deshmukh, P. R., Lokhande, C. D., 2011. Chemical Synthesis of Nanocrystalline SnO<sub>2</sub> Thin Films for Supercapacitor Application. *Applied Surface Science* **257**(22), 9498–9502.
- Ribeiro, P. F., Johnson, B. K., Crow, M. L., Arsoy, A., Liu, Y., 2001. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications. *Proceedings of the IEEE* **89**(12), 1744–56.
- Sharma, R. K., Rastogi, A. C., Desu, S. B., 2008. Manganese Oxide Embedded Polypyrrole Nanocomposites for Electrochemical Supercapacitor. *Electrochimica Acta* **53**(26), 7690–95.
- Simon, P., Gogotsi, Y., 2010. Materials for Electrochemical Capacitors. In *Nanoscience And Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals*, World Scientific, 320–29.
- Smith, E. L., Abbott, A. P., Ryder, K. S., 2014. Deep Eutectic Solvents (DESS) and Their Applications. *Chemical reviews* **114**(21), 11060–82.
- Wang, D. W., Li, F., Zhao, J., Ren, W., Chen, Z. G., Tan, J., Cheng, H. M., 2009. Fabrication of Graphene/Polyaniline Composite Paper via in Situ Anodic Electropolymerization for High-Performance Flexible Electrode. *ACS nano* **3**(7), 1745–52.
- Wang, G., Zhang, L., Zhang, J., 2012. A Review of Electrode Materials for Electrochemical Supercapacitors. *Chemical Society Reviews* **41**(2), 797–828.
- Wang, H., Yang, Y., Liang, Y., Robinson, J. T., Li, Y., Jackson, A., Dai, H., 2011. Graphene-Wrapped Sulfur Particles as a Rechargeable Lithium–Sulfur Battery Cathode Material with High Capacity and Cycling Stability. *Nano letters* **11**(7), 2644–47.
- Winter, M., Brodd, R. J., 2004. What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?
- Wu, H., Li, Y., Ren, J., Rao, D., Zheng, Q., Zhou, L., Lin, D., 2019. CNT-Assembled Dodecahedra Core@ Nickel Hydroxide Nanosheet Shell Enabled Sulfur Cathode for High-Performance Lithium–Sulfur Batteries. *Nano Energy* **55**, 82–92.
- Xiong, X., Ding, D., Chen, D., Waller, G., Bu, Y., Wang, Z., Liu, M., 2015. Three-Dimensional Ultrathin Ni(OH)<sub>2</sub> Nanosheets Grown on Nickel Foam for High-Performance Supercapacitors. *Nano Energy* **11**, 154–61.
- Yadav, A. A., Chavan, U. J., 2018. Electrochemical



Supercapacitive Performance of Spray-Deposited NiO Electrodes. *Journal of Electronic Materials* **47(7)**, 3770–78.

Yu, Z., Tetard, L., Zhai, L., Thomas, J., 2015. Supercapacitor Electrode Materials: Nanostructures from 0 to 3 Dimensions. *Energy & Environmental Science* **8(3)**, 702–30.

Zhang, Y., Feng, H., Wu, X., Wang, L., Zhang, A., Xia, T., Zhang, L., 2009. Progress of Electrochemical Capacitor Electrode Materials: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy* **34(11)**, 4889–99.

Zhi, M., Xiang, C., Li, J., Li, M., Wu, N., 2013. Nanostructured Carbon–Metal Oxide Composite Electrodes for Supercapacitors: A Review. *Nanoscale* **5(1)**, 72–88.